

文章编号 1004-924X(2002)03-0307-06

# 光学镜头光学机械一体化 CAD 软件设计

胡 君,杨近松,孙 辉

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130021)

**摘要:**光学镜头光学与机械一体化 CAD 软件应用多数据库通信技术,首次改变了光学镜头分光学与机械两阶段的传统设计模式,实现光学与机械设计一次成功,跨越了机械设计阶段中的结构设计和大量零部件制图工作。通过系统提供的建立光学系统、光线追迹、像差计算、变焦距设计、像质评价和系统连接等程序模块完成光学系统设计与计算,并建立了光学设计参数和系统参数数据库。经选取该数据库的参数和光学系统型式后,系统控制程序运行自建的公用函数库和机械零部件数学模型程序库,达到自动生成光学镜头机械结构零部件图的目的,使光学镜头机械结构实现自动化设计。并给出了专用电视摄像机变焦距设计的实例。

**关键词:**光学镜头;光学机械一体化;CAD 软件系统  
**中图分类号:**TP391.72 **文献标识码:**A

## 1 引言

计算机辅助光学设计(Computer Aided Optical Design, CAOD)和计算机辅助机械设计(Computer Aided Mechanical Design, CAMD)软件,在发达国家已经得到普遍应用。CAOD 软件如:CODE 和 ZEMAX,已经广泛应用,并且可用于微机上。CAMD 软件也是比较成熟的技术,目前在国际上流行的各种 CAMD 的软件产品有几十种。但光学镜头光学与机械一体化 CAD 软件,还未见报道。

目前在光学镜头设计过程中,仍然采用传统的分两阶段的方法进行。首先根据光学镜头的用途和应用者的要求,光学设计者实施光学设计和计算;然后再依据光学设计结果,由机械结构设计人员完成机械设计。由于前后两阶段设计过程分属两个不同的学科,即:光学设计属光学领域,机械设计属机械领域。在二者交接过程中涉及的问题较多,造成设计周期拖长和更改设计困难等现象时有发生。

从产品生产的角度出发,如何解决设计与设

计、设计与工艺、设计与检测、设计与生产及设计与制造等之间的信息通讯,达到产品生产一体化的目标是目前急需解决的关键技术问题。

光学镜头光学与机械采用一体化 CAD 设计,加快了设计速度,节省了人才资源,提高劳动效率,降低了成本,使光学镜头机械设计逐步形成信息化、参数化和自动化。

## 2 光学机械一体化设计原理

### 2.1 软件工作过程

首先进行光学设计,根据用户需求,建立和修改光学系统数据,完成用户输入的光学系统参数,根据需要修改这些参数或调整镜面位置等;在光路追迹中,可实现选择多种色光、各种视场、带光线等,依据输入的参数,计算光线在光学系统中各个镜面的位置;再通过计算光学系统中各种视场、每个镜面的像差,显示像差数据并绘制像差曲线,至此,完成光学设计与计算。但在实际设计过程中,由于光学系统存在着像差,使能量分散,不一定达到真正的理想设计要求,需要对光学成像的质量进行计算评价,以判断设计的结果优劣,本软

件也提供了像质评价功能。

其次进入机械设计阶段。运行嵌入到 AutoCAD 中的光学镜头结构设计软件。先选取光学系统结构模型,再读取数据参数文件或输入参数,建立相关的数据库,通过软件的绘图功能实现镜头的结构零部件图自动设计。

最后,利用 AutoCAD 的编辑功能,对图形进

行编辑修改,达到设计要求后再存入图形库,或由绘图仪输出工作图样,从而完成光学镜头光学与机械一体化 CAD 设计过程。

### 2.2 多数据库技术应用

光学镜头光学机械一体化 CAD 软件的工作过程,是应用了多数据库结构进行信息通信的原理,原理模块如图 1 所示。

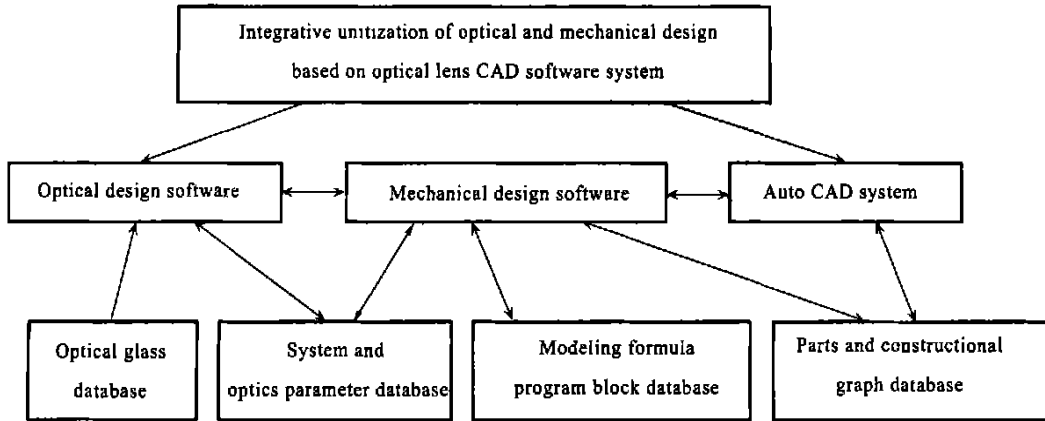


图 1 数据库应用关系图

Fig. 1 Diagram of database applications.

国内外光学玻璃表数据库。系统工作前建立并存储国内外各种玻璃表,在光学设计过程中,通过光学设计程序控制,随时选取所需的玻璃牌号,玻璃牌号一旦确定,在后来的机械设计中不能更改。

系统参数与光学参数数据库。在光学设计过程中建立,绝大部分是通过光学计算获得,个别数据是在光学设计过程中输入的。受光学设计与计算和机械设计两个软件模块运行控制,光学设计程序完成数据库的建立、修改和有选择的输出打印,机械设计程序完成对数据库数据的读取并应用。

模型化公式程序模块数据库。把各种不同类型不同结构的光学镜头机械零件、部件和结构模型化,完成这些模型化的数学公式程序设计,在机械设计控制程序的管理下,建立较大的数据库。在应用过程中,实际上相当于计算机语言中的标准函数库。

零部件图数据库。用于存储经软件系统完成的各种结构零部件图等,以备在 AutoCAD 系统平台下的修改和输出绘制,由机械设计软件模块控制和管理。

## 3 软件设计

### 3.1 光学 CAD 软件

#### 3.1.1 光学 CAD 软件主要特点

操作便利。该部分是光学镜头光学机械一体化 CAD 软件系统的一部分,基于 Windows98 操作系统环境下开发的专用软件,有很强的人机对话功能,输入参数和有关的修改非常方便,如:删除一面、增加一面,非常简单无需繁杂的操作。

功能直观明了。在操作面版上具有四种区域的可操作模式:即功能菜单、控制按钮、控制参数选择及显示区等部分。功能菜单区列出了本软件全部功能;控制按钮区列出了功能菜单中最常用的功能;控制参数区列出了控制输入参数和选择计算结果输出方式等;显示区则显示各种数据、图形和曲线。如图 2 所示。

变焦距物镜的高斯光学和用初级像差求解初始结构的功能。可通过高斯光学计算变焦距镜头的各种参数,解决变焦距镜头中各透镜组的焦距分配和各透镜组之间的间隔问题。

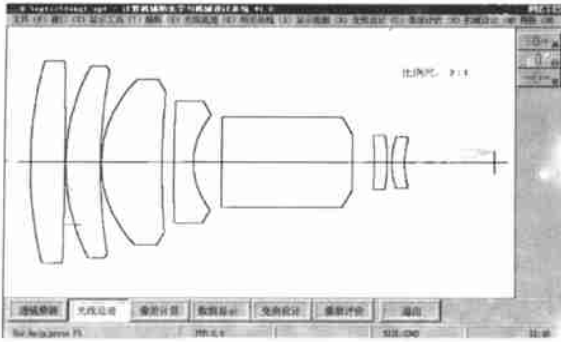


图 2 用户界面操作面板

Fig. 2 User operating panel.

选择玻璃速度快。系统带有玻璃牌号数据库,只要选定玻璃生产国和牌号,立即可得到所需的玻璃。

输出打印方便。能随时选择 Windows98 系统中的各种不同类型打印机输出所需的数据,打印输出格式简捷,并增加了各种波长的  $X_s$ 、 $X_t$ 、像散和畸变;像差曲线图增加了  $T_{Az}$ (弧矢慧差)曲线;光学系统结构示意图比例准确。

### 3.1.2 光学 CAD 软件设计

光学 CAD 软件以模块结构并应用数据库技术实现的,主要程序有创建光学系统、光线追迹、像差计算、数据显示、变焦设计、像质评价和系统连接等部分。

创建光学系统,主要提供了较强的人机交互功能,用户可以方便快捷地输入各种光学系统参数,如:入瞳、像面距离、视场角及系统像面数、光学特性参数等。

光学系统的数据文件创建以后,选择光线追迹实现对所创建的光学系统绘制光路图,首先选择追迹光线数、色光、追迹光线视场等光线设定参数,确定每条光线是近轴光线、轴上光线、主光线、子午光线还是弧矢光线等。

像差计算是选择计算共轴系统球面和非球面的各类像差,包括轴向和垂轴几何像差、波像差等。

计算结果可显示各种像差曲线图、各种光学系统结构图、光路追迹、像差曲线及数字结果,同时还可以通过打印机打印输出。

变焦距光学系统设计主要是通过透镜组沿光轴移动而改变焦距的,一般来说像面伴随位移,而需要补偿像移的方法实现变焦距过程像面稳定之要求,可采用机械补偿法和光学补偿法,本系统采

用机械补偿法。

机械补偿法是用一个透镜组(称为补偿组)作为少量的移动来补偿像面位移。它的移动与变倍组(主要用于改变焦距)的移动不是同方向等速度的,因补偿组与变倍组之间的相对运动不能用一个简单的机构来满足,而需要用凸轮机构。如图 3,是机械补偿法变焦距物镜的示意图。它由前固定组 1,变倍组 2,补偿组 3 和后固定组 4 所构成。变倍组 2 做线性运动,补偿组 3 做相对少量的非线性运动,以达到光学系统即变倍而像面位置又稳定的要求。图中变倍组 2 从左到右移动时,系统焦距由短变长,同时像面也发生位移。变倍组 2 和补偿组 3 的位置是一一对应的,因变倍组 2 在不同的位置时,补偿量不同才能保持像面位置的稳定。补偿组 3 是负透镜组时,称为机械补偿法负组补偿,补偿组是正透镜时,称为机械补偿法正组补偿。

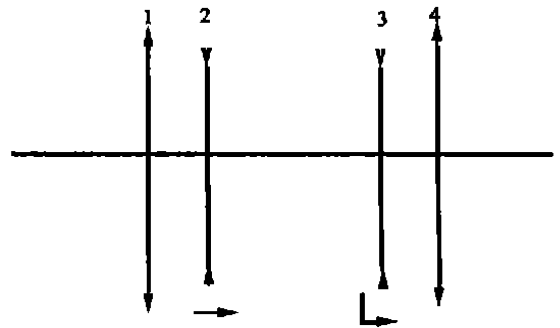


图 3 补偿法

Fig. 3 Compensation method.

变焦距镜头光学设计首先是根据使用要求确定设计参数,即变焦距物镜的焦距、倍比、相对孔径、视场以及最近拍摄物距等。依据<sup>[4]</sup>高斯光学计算公式和初级像差求解方程式,应用阻尼最小二乘法求极小值的方法,在计算机程序的控制下通过求解阻尼法方程等,最终实现变焦距镜头光学 CAD 的目标。

像质评价系统参考<sup>[1]</sup>光学系统的“光学传递函数”(Optical Transfer Function, OTF)作为成像的质量计算评价算法,从波像差出发,计算 OTF 的方法分两大类,它们是自相关积分法和二次傅里叶变换法,本系统采用的自相关积分法,计算了相互垂直的弧矢、子午的 OTF。

根据帕色伐尔定律,将 OTF 表示为光瞳函数

$f(u, v) = e^{ikw(u, v)}$  的自相关积分函数:

$$D(s, t) = \frac{1}{2} \iint f(u + \frac{s}{2}, v + \frac{t}{2}) \cdot f^*(u - \frac{s}{2}, v - \frac{t}{2}) d u d v$$

$$= \frac{1}{2} \iint e^{-ik[w(u+\frac{s}{2}, v+\frac{t}{2}) - w(u-\frac{s}{2}, v-\frac{t}{2})]} d u d v$$

其中  $u, v$  是光瞳坐标,  $W(u, v)$  是波差函数, 是波面上各处的振幅变化,  $s, t$  分别是弧矢、子午方向上的空间频率,  $(s/2, t/2)$  和  $(-s/2, -t/2)$  为光瞳重叠区,  $f^*$  是  $f$  的复数共轭,  $k = 2\pi / \lambda$  ( $\lambda$  是单色波长)。

首先对每个视场追迹几条适当高抽样的光线, 写出光程差, 然后用拟合的办法求出波差多项式, 再用高斯积分法对  $D(s, t)$  进行二重积分, 最终求得 OTF。

系统连接主要是 CAOD 软件与国内外玻璃表数据库之间、CAOD 软件与系统参数、光学参数数据库、CAOD 与 CAMD 软件的连接, 控制关系如图 1 示。

### 3.2 模型化公式程序模块数据库

在实现光学、机械一体化设计过程中的机械结构设计部分, 实际上是通过计算机程序控制, 围绕一些数据库操作进行编程。整个数据库主要由零部件数学模型程序、装配图模型程序及有关处理函数库程序组成。

#### 3.2.1 公用函数库

为了减少机械零部件及装配图程序数据库的容量, 首先建立一些绘图所需的参数化基本实体, 如: 点、线、圆、圆弧的函数等, 再编制一套符合国家标准尺寸标注、形位公差标注和表面粗糙度标注等函数库, 并以动态链接库的形式为系统的独立程序模块所共享。

#### 3.2.2 零部件数学模型程序

根据实际设计镜头的经验, 对所选镜头机械零部件进行公式化, 依据光学设计对这种镜头的基本要求完成对零部件设计理论分析, 如: 零部件尺寸设计、精度、几何形状及在装配图中所处位置等。

### 3.3 自动生成机械结构设计图

#### 3.3.1 程序工作原理

启动系统控制程序并进行初始化, 根据系统提供的光学系统功能和类型, 选取合适的光学系统结构形式; 再通过系统参数、光学参数数据库,

选择读入光学镜头结构设计系统参数和光学参数, 或通过对话框输入这些参数。其中包括: 球面半径、通光孔径、镜面间距离、光栏与变倍组之间的距离、光栏与补偿组之间的距离、光栏最大通光孔径等; 把读入的参数作用于零部件结构数学模型, 计算出镜头结构各零部件尺寸, 并由零部件结构几何模型处理生成零件图和装配图; 最后进行编辑修改, 满意后再存入零部件、结构图数据库, 或由绘图仪输出工作图样, 其工作过程如图 4 所示。

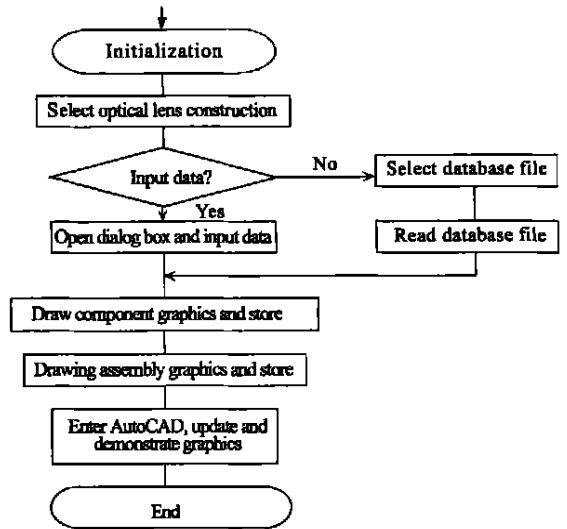


图 4 机械结构设计原理流程图

Fig. 4 Block diagram of mechanical construction design.

#### 3.3.2 程序设计方法

在机械结构设计和一体化处理的软件系统中, 采用 VC++ 语言完成编程, 应用 Windows 的函数和 AutoCAD 系统提供的接口程序, 实现光学程序、机械结构程序和 AutoCAD 系统的有效连接, 同时通过应用多数据库技术完成各部分的数据通信。按功能分有以下四大模块:

##### (1) 模型化公式程序模块数据库

应用 VC++ 语言编制了以零部件图和装配图为单元公式化程序, 以 DXF 文件的数据格式建立模型化公式程序模块数据库。

##### (2) 参数读出或输入

应用 VC++ 语言的对话框功能, 选取光学结构, 读出系统参数、光学参数数据库中所需的参数或通过对话框的形式输入所需参数, 后者是本系统提供的非本系统光学设计时的应用方式。

##### (3) 自动生成零部件和装配图

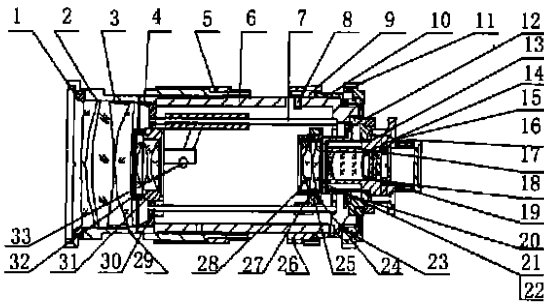
由于本系统所有零部件和机械结构都已经模型化公式程序,在给定参数并被调用后,立刻自动生成零部件和装配图,并可存储起来或通过绘图仪输出。

(4) 零部件、装配图编辑原理

利用 AutoCAD 系统提供的各种接口功能,修改 AutoCAD 系统的主菜单文件,把所有可运行程序以文件夹的形式嵌入到 AutoCAD 系统中,利用 AutoCAD 系统中全部功能,实现对零部件和装配图的修改和编辑。

### 4 光学镜头一体化设计实例

按用户要求,应用本系统的光学部分对一个专用电视摄像机变焦距镜头进行设计和计算,计算结果与用其它光学设计计算结果比较是完全一致的,如:表 1、表 2 所示。然后再用该参数直接



1. Front - section pressing ring , 2. Focusing bobbin , 3. Front - section pressing repair ring , 4. Main body pressing ring , 5. Focusing restricted ring , 6. Main body , 7. Circle guide rail , 8 Focusing lever nail , 9. Zoom gear wheel , 10. Focusing compression ring , 11. Diaphragm gear wheel , 12. Diaphragm lever nail , 13. Tail main compression ring , 14. Connective notching , 15. Tail cover , 16. Tail main body , 17. Fixation - section lens cell , 18. Tail - section pressing ring , 19. Tail - section iris , 20. Diaphragm moving - ring , 21. Diaphragm fixation ring , 22. Diaphragm sheet , 23. Main body closing ring , 24. Compenseating repair ring , 25. Compenseating slide frame , 26. Compenseating lens cell , 27. Zoom diaphragm ring , 28. Focusing pressing ring , 29. Focusing restricted nail , 30. Supporing ring , 31. Variable power slide frame , 32. Variable power pressing ring , 33. Anchor nail .

图 5 变焦距机械结构

Fig.5 Mechanical construction of the zoom lens.

实现机械结构自动化设计和计算,设计的机械装配图如图 5 所示。

表 1 专用电视摄像机光学系统设计参数(单位:mm)

Table 1 Optical system design parameters for the special purpose camera(unit:mm)

Angle of field of vision	Image distance	Diaphragm maximum clear aperture	Diaphragm rear - section distance	Zoom - section lens
54.46	24.382	12.00	2.000	38.0921

表 2 专用电视摄像机光学设计参数

Table 2 Optical design parameters for the special purpose camera

Sphere radius R (mm)	Sphere distance d (mm)	Clear aperture r (mm)
297.1100	0	48.00
68.7090	2.2400	47.50
84.3200	2.2600	48.40
- 136.5230	9.8200	48.40
49.0000	0.0600	47.00
297.1100	7.0000	48.00
79.8000	1.2560	21.20
17.0140	0.9600	18.30
- 23.7100	5.1200	17.70
16.1150	0.8950	17.70
16.1150	0.0000	17.30
414.6970	3.8000	17.30
151.4500	60.3840	17.40
20.0000	0.9600	18.00
20.0000	0.0000	18.00
- 37.3300	4.1000	18.00
29.2260	0.0600	18.00
480.5380	3.0000	18.00
- 18.9100	4.3500	9.20
13.3500	0.8000	9.20
13.3500	0.0000	9.20
20.0000	15.2900	9.20
36.0000	0.4000	9.20
16.3170	2.4000	9.50
0.0000	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	0.00
197.0000	0.0600	9.50
37.7420	0.8000	9.50
37.7420	0.0000	9.50
- 27.2300	2.8000	9.50

## 5 结束语

光学镜头光学与机械一体化 CAD 软件设计,是计算机辅助设计的发展趋势,应用本系统实施光学镜头设计,操作非常方便、设计速度快、效率

高,有广泛的应用价值,目前还未见同类光学镜头一体化 CAD 软件系统的报道。光学镜头机械结构自动设计专用软件系统,已经覆盖了部分一般常用的工业应用光学镜头,但为了适应用户的不同领域使用要求,今后需要在研制中不断增加新的镜头机械结构零部件。

### 参考文献:

- [1]孙国良,翁志成,施卫英.如何在 IBM PC 微机上进行计算机辅助光学设计[J].光学机械,1987(4,5):11-193.
- [2]Hildebrand KJ. Integration of optical and mechanical design based on professional CAD software. Lens Design, Illumination, and Optomechanical Modeling[J]. SPIE, 1997,3130:121-127.
- [3]杨劲松.光学镜头机械结构参数化设计系统开发[J].光学精密工程,1999,7(6):6-9.
- [4]林大键.工程光学系统设计[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [5]常群.光学设计文集[M].北京:科学出版社,1976.
- [6]李兴华.含有凸轮机械的机电系统建模与仿真[J].光学精密工程,1999,7(5):49-55.
- [7]吴一辉.盘波发生器谐波传动系列的智能化绘图软件系统[J].光学精密工程,1993,1(2):65-71.
- [8]陆润民.C语言绘图教程[M].北京:清华大学出版社,1996.

## Integrative unitization of optical and mechanical design based on optical lens CAD software system

HU Jun, YANG Jin-song, SUN Hui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

**Abstract:** This optical lens CAD software system has carried out the integrative unitization of optical and mechanical design based on the communicative technology of multi-database. So the traditional design of an optical lens with two stages of optical and mechanical method has been changed into one time design for the first time. The system can supply such program blocks as those for creating optical system, tracing rays, computing optical aberration, designing zoom lenses, evaluating image quality, and interconnecting systems, etc. All of them will accomplish optical system design, parameter computation, creation of the database for optical design and system parameters. After the database file parameters and optical system model are selected, the system control program runs the database program for the self-creating public function and the mathematical models of mechanical components. Then the optical lens CAD software system automatically generates the mechanical graphics of components. In this way, the autodesign of an optical lens has been realized. Finally, the article illustrates the example of designing a zoom lens for professional TV camera.

**Key words:** optical lenses; integrative unitization of optical and mechanical design; CAD software system

**作者简介:**胡君(1952-),男,吉林省蛟河人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所高级工程师,1980年毕业于吉林大学计算机科学系,同年被分配长春光机所一直从事科学研究工作。